

## Máquinas síncronas com ímãs permanentes e motores assíncronos – o futuro da mobilidade urbana

### *Synchronous machines with permanent magnets and asynchronous motors – the future of urban mobility*

Lucas Nicoletti<sup>1</sup>  
João Marcelo Tambalo Paparelli<sup>2</sup>  
Alex Fabiano Bueno<sup>3</sup>

#### Resumo

Pelo estudo do desenvolvimento de novas ligas metálicas, com propriedades eletromagnéticas específicas e de novas ligas magnéticas à base de NdFeB, a sistemática de funcionamento de motores elétricos é apresentada. Nesse escopo, as atuais soluções aos problemas de baixa autonomia e eficiência energética, inerentes aos motores síncronos e assíncronos, são explicadas. Sendo assim, este artigo pretende revisar as tecnologias de disposição e montagem das peças do conjunto motor, diminuindo os custos de fabricação relacionados a essa categoria, e aumentando a atratividade de veículos elétricos nos cenários mundial e brasileiro.

**Palavras-chave:** ligas de NdFeB; veículos elétricos; motores elétricos.

#### Abstract

*By the study of the development of new metallic alloys, with specific electromagnetic properties and of new magnetic alloys based on NdFeB, the systematics of electric motor operation is presented. In this scope, the current solutions to the problems of low autonomy and energy efficiency, inherent to synchronous and asynchronous motors, are explained. Therefore, this article aims to review the technologies for the arrangement and assembly of the parts of the motor assembly, reducing the manufacturing costs related to this category and increasing the attractiveness of electric vehicles in the world and Brazilian scenarios.*

**Keywords:** NdFeB alloys; electric vehicles; electric motors.

1 Graduando em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9271-2472>. E-mail: [lucas.nicoletti0@gmail.com](mailto:lucas.nicoletti0@gmail.com).

2 Graduando em Engenharia de Materiais pela UFSC. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4015-3963>. E-mail: [jm.tp@hotmail.com](mailto:jm.tp@hotmail.com).

3 Doutor em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais pela UFSC, mestre em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil e professor na UFSC. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7241-2360>. E-mail: [alexbueno9898@gmail.com](mailto:alexbueno9898@gmail.com).



## 1 Introdução

Com o objetivo de otimizar e aprimorar a produção de artefatos da indústria automobilística brasileira, será proposto um estudo para o desenvolvimento de dois motores elétricos diferentes entre si: um de indução magnética convencional e outro do tipo motor síncrono de ímãs permanentes internos. Esse último foi inspirado no IPMSynRM da Tesla que faz uso de indução magnética e de relutância. Dessa forma, pretende-se gerar um grande impacto no mercado automotivo, trazendo consigo, inovações e mais eficiência.

Com o avanço da tecnologia em seus produtos e a pressão dos ambientalistas sobre os poluentes gerados por combustão de motores, a indústria automobilística começou a investir em veículos elétricos e híbridos. O aperfeiçoamento do motor elétrico está cada dia mais em pauta, pois, além de acabar com a emissão de gases estufa, ele é bem mais eficiente (SANTOS, 2017).

O nível de emissão de gases poluentes, que um veículo de motor à combustão gera, é medido em gramas de dióxido de carbono por quilômetro rodado ( $\text{gCO}_2/\text{km}$ ) e, como é de conhecimento geral, a queima de combustíveis fósseis, principalmente da gasolina e do diesel, expõem muitos gases, como: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), metano ( $\text{CH}_4$ ), aldeídos (CHO), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), todos prejudiciais à saúde, pois são capazes de causar problemas respiratórios – podendo chegar até a uma asfixia – e, ao meio ambiente, já que alguns desses são gases de efeito estufa. Com a criação do motor elétrico, essa emissão de poluentes chegou a zero, principal fator que chama atenção das indústrias automobilísticas e dos ambientalistas (JEREMIAS, 2018; OLIVEIRA, 2020).

O preço do combustível é outro fator que prejudica o consumidor brasileiro. Esse preço é definido por cinco componentes: o valor na refinaria, os impostos federais (Confis, Cide e PIS), um imposto estadual (ICMS), o valor de distribuição e lucro dos postos. Segundo o levantamento da Fecombustíveis (Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes), cerca de 43,3% e 25% dos valores da gasolina e do diesel, respectivamente, equivalem a impostos (AZUAGA, 2000; TAFFAREL, 2015).

Como um veículo elétrico é alimentado com energia elétrica, é necessário o uso de baterias. O abastecimento dessas pode ser feito dentro da própria casa do proprietário, e o preço pode ser até cinco vezes menor que um veículo à combustão (BOÇON, 2019; CAVALCANTE JÚNIOR, 2021).

## 2 Revisão bibliográfica

A obtenção de motores elétricos com alta eficiência e autonomia, tanto baseando-se nos motores síncronos, movidos a partir de um sistema formado por ímãs permanentes internos ou mesmo aqueles que se utilizam de indução magnética convencional, dependem de diferentes componentes que serão responsáveis por produzir o movimento desejado (KHAN *et al.*, 2019).

Neste artigo, serão apresentados de maneira detalhada, os principais componentes utilizados na construção desses motores e suas principais funções, sendo eles: o rotor, o estator, o *case* do motor e os ímãs utilizados para criação dos campos magnéticos. Além disso, será discutido o funcionamento desses campos e qual a metodologia empregada para que seja feito seu isolamento (KHAN *et al.*, 2019).

### 2.1 Motores elétricos assíncronos e síncronos de ímãs permanentes

O funcionamento dos dois tipos de motores elétricos é muito similar, visto que a propulsão de ambos é criada por meio das interações entre o campo eletromagnético gerado no estator do motor e o rotor do mesmo. A principal diferença de ambos se encontra nessa interação entre o campo e o rotor, onde no motor síncrono, as rotações do rotor estão sincronizadas com a movimentação do campo magnético, enquanto em motores assíncronos não há essa sintonia (YILMAZ, 2015).

Os motores assíncronos (também chamados de motores de indução) diferem entre si tanto pela arquitetura do rotor, podendo ser do tipo bobinado ou gaiola-de-esquilo, quanto pela corrente utilizada, podendo ser monofásico, bifásico ou trifásico. Dentre essas diferentes arquiteturas, a que mais se destaca é a trifásica gaiola-de-esquilo, por ser autoiniciada e econômica frente às demais (YILMAZ, 2015).

A principal vantagem de motores assíncronos, frente aos síncronos, dá-se pelo alto torque inicial que possuem (possibilitando ao motorista a alternativa de parar e movimentar o veículo em terrenos íngremes ou irregulares com facilidade) e na capacidade (no caso do tipo gaiola-de-esquilo) de serem autoiniciadores, fazendo com que o veículo atinja altas velocidades em curtos períodos de tempo. Por fim, esses motores também têm uma vantagem frente aos motores síncronos de ímãs permanentes, por conta de seu baixo custo de produção, e de não sofrerem com o Back-EMF (GOSS; POPESCU; STATON, 2013).

Já os motores síncronos se diferem em seu princípio de funcionamento, onde os principais formatos utilizados são os motores de relutância, os motores de ímãs permanentes e os IPMSynRM, que utilizam princípios de relutância, enquanto possuem ímãs permanentes em seu núcleo. A principal desvantagem dos motores de relutância é o baixo torque inicial, exigindo um motor de arranque no veículo, enquanto sua principal vantagem é o baixo custo de produção e sua eficiência em altas velocidades. Já os motores de ímãs permanentes possuem altíssimo torque inicial, porém possuem um custo elevado de montagem, além de perderem eficiência em altas velocidades por conta do Back-EMF. Por fim, os motores IPMSynRM remediaram tanto os problemas de baixo torque inicial quanto de baixa eficiência, por meio de uma arquitetura única do rotor, onde o seu posicionamento, em relação ao campo magnético, consegue variar o torque inicial e o Back-EMF que o motor irá sofrer.

Apesar dessas facilidades, por conta de sua estrutura, motores assíncronos, em geral, não conseguem alcançar velocidades superiores às de motores IPMSynRM, além de apresentarem um desempenho inferior, quando em situações, onde o veículo alcança e se mantém em altas velocidades. Tais fatores ocorrem, devido à forma que o motor funciona, onde, para induzir o campo

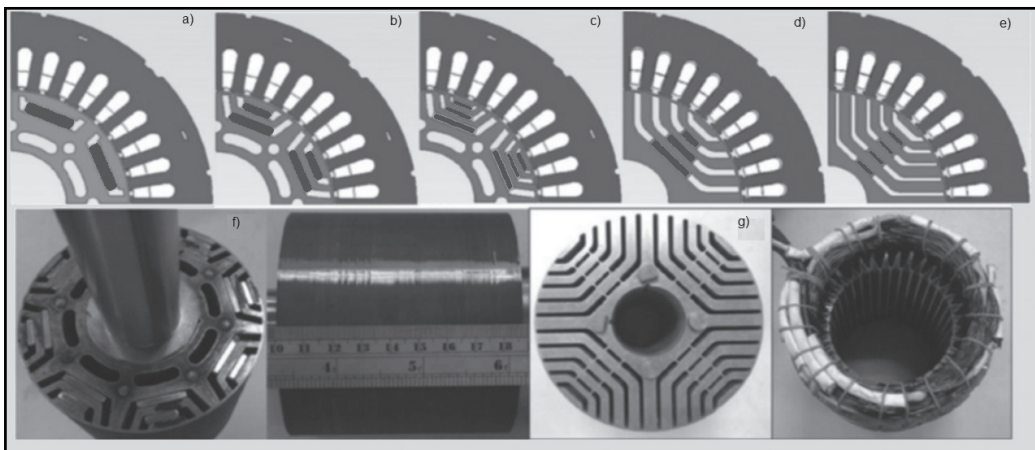
eletromagnético no rotor, o veículo necessita utilizar grande quantidade de energia, algo pouco prático em veículos elétricos (DORELL *et al.*, 2012).

## 2.2 Rotores para motores elétricos

Os motores IPMSRM ou, traduzindo do inglês, Motores Síncronos de Ímãs Permanentes Internos são os mais utilizados na indústria automotiva, visto que possui alta densidade de torque. Esses motores possuem diversas variações, as quais possuem diferentes vantagens e aplicações que, no geral, são oriundas de modificações nas arquiteturas dos rotores, buscando balancear o torque gerado pelo motor, seu custo produtivo e sua eficiência energética (KHAN *et al.*, 2019).

A composição dos rotores consiste em finas placas de material ferromagnético, eletricamente isoladas umas das outras, com pequenos vãos, onde são posicionados ímãs permanentes, em configurações que visam fazer melhor uso do campo eletromagnético gerado pelo estator. A figura 1 apresenta ilustrações de diferentes arquiteturas de rotores, sendo que, somente dois deles, aparecem montados, enquanto que o estator aparece em todas as ilustrações (EHSANI; YIMIN; GAY, 2003; SEO *et al.*, 2009; STAUNTON *et al.*, 2004; ZERAOULIA; BENNOUZID; DIALLO, 2006).

Figura 1 – Diferentes arquiteturas internas



Fonte: Anh e Hsieh (2017).

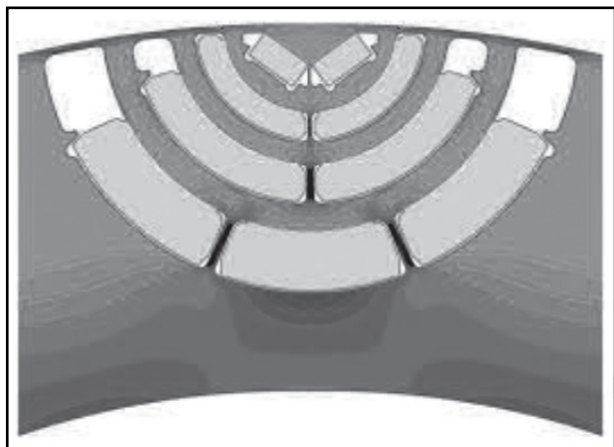
Na figura 1, observa-se as diferentes configurações de disposição dos ímãs dos rotores de motores síncronos internos, representados pela cor azul. As imagens A, B, C, D e E ilustram múltiplas arquiteturas internas para o rotor, enquanto as imagens F e G, são respectivamente, os modelos B e E montados. Essas diferentes disposições influenciam a forma que o campo eletromagnético, gerado pelo estator, age sobre o

rotor, tendo como consequência das diferentes configurações, uma mudança de torque. Entre as disposições de melhor *performance*, estão aquelas de ímãs em semicírculo, como apresentado na figura 2, enquanto as de menor custo, são aquelas que usam ímãs retos, de tamanho igual. Outro exemplo de arquitetura funcional, para esses motores, é o modelo em “V”, o qual alia um torque superior àquele encontrado nos ímãs

retos, porém inferior ao encontrado na arquitetura em semicírculo e com uma boa relação custo-benefício.

A arquitetura em “V”, mostrada na figura 3, têm custo inferior à arquitetura em semicírculo, visto que a geometria dos ímãs dispostos é mais simples, pois consiste em dois ímãs retos, enquanto o semicírculo necessita de ímãs curvos, como mostra a figura 2. Todos os rotores de IPMSRM possuem ímãs permanentes, geralmente de terras raras, em sua estrutura, o que ocasiona um elevado custo de fabricação, apesar da maior eficiência, frente a demais motores, já que, diferente de motores de indução, não necessitam de corrente em seus rotores (MORIMOTO; SANADA; TAKEDA, 2001; MUN, 2017; YEDAMALE, 2003; YILMAZ, 2015).

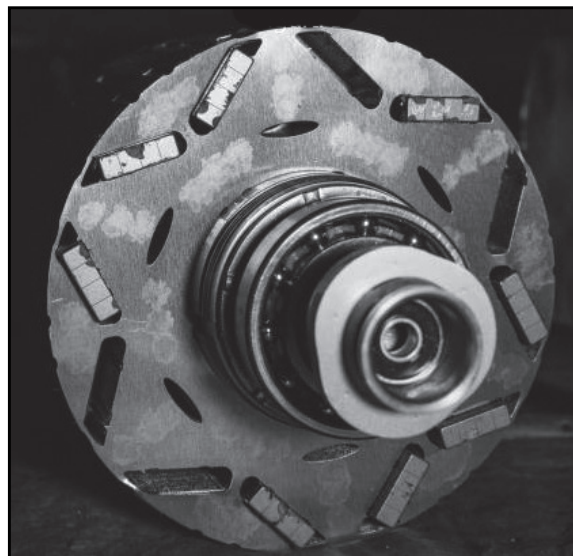
Figura 2 – Arquitetura em semicírculo



Fonte: Jurkovic (2015).

Um dos desafios na construção de rotores do gênero é lidar com correntes parasitas, ou seja, correntes que geram um campo eletromagnético, com sentido oposto ao sentido do campo criado pelo estator, criadas pela tensão que a corrente alternada utilizada induz no núcleo do aparato e que causam perda de eficiência no conjunto motor. Esse fenômeno provoca elevação na temperatura do conjunto do motor, podendo danificar tanto a estrutura, quanto os ímãs no conjunto. Buscando resolver tal problema, as soluções mais aplicadas são: fabricar o núcleo do rotor com lâminas eletricamente isoladas umas das outras, de espessura mínima, barrando a corrente induzida no motor e desenvolver ligas simultaneamente magnéticas e resistivas à eletricidade, como as ligas de aço (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 1990; NASAR, 1987; PIRES, 2008).

Figura 3 – Arquitetura em V



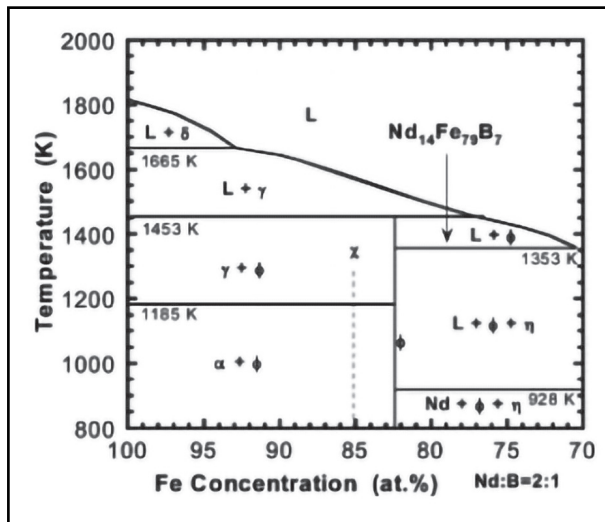
Fonte: Sarturi (2014).

Tais lâminas são, normalmente, feitas de aço-carbono, devido ao baixo custo de produção do mesmo, porém esse material apresenta problemas quanto ao isolamento elétrico e pode diminuir a eficiência do conjunto motor. Outra opção de uso, é o aço-silício não-orientado que possui propriedades magnéticas e eletroisolantes maiores que as do aço-carbono, devido à adição de silício. A confecção dessas lâminas ocorre por meio da laminação e corte de chapas de aço, seguidos por um tratamento para a isolação elétrica. O tratamento é normalmente feito, através da oxidação do metal, criando uma camada isolante em torno das chapas, também é utilizada a aplicação de vernizes isolantes em meio ao estator estator (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 1990; LALL; BAUM, 1998; NASAR, 1987; PIRES, 2008).

### 2.3 Ímãs de NDFEB

Os ímãs, obtidos a partir da combinação entre Neodímio, Ferro e Boro, são conhecidos por suas propriedades magnéticas superiores à grande maioria dos ímãs, sendo considerados, portanto, ímãs permanentes. Esse tipo de material, em geral, apresenta, em sua microestrutura, grãos com grande quantidade de neodímio, presente nas regiões de contornos, e duas fases principais compostas, uma por  $Nd_{14}Fe_{2}B_4$  ( $\eta$ ) e outra por  $Nd_{2}Fe_{14}B$  ( $\Phi$ ), como pode ser visto na figura 4. Sendo assim, ao se tratar de motores magnéticos, tais ímãs se apresentam como uma boa proposta para uso (DURRANT, 2013; MÜNCHEN, 2016).

Figura 4 – Diagrama de fases da liga NdFeB



Fonte: Durrant (2013).

Para ímãs permanentes, feitos à base da liga NdFeB, é indispensável que a fase  $\Phi$  esteja presente, visto que é a única fase ferromagnética do material, sendo possível sua existência em diversas composições diferentes para a liga, como pode ser observado no diagrama de fases, representado na figura 4. Porém, existe uma limitação para o uso desse tipo de material, quanto ao uso em temperaturas muito altas ou baixas, variando entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e tendo seu ponto de Curie em  $312^{\circ}\text{C}$ , perdendo, portanto, suas propriedades magnéticas (MÜNCHEN, 2016; ÖNAL *et al.*, 2017).

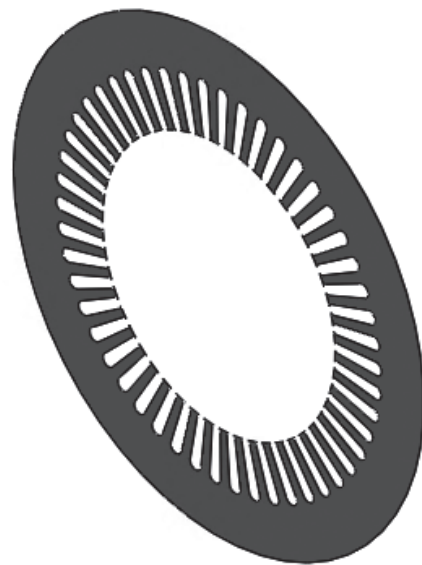
Devido à geometria exigida para determinadas peças, principalmente ao se tratar de ímãs para motores, deve-se também conhecer os caminhos de processamento disponíveis para obtenção dos perfis. Para tanto, deve-se, após a obtenção do neodímio, a partir do seu estado oxidado, processá-lo por meio da sinterização, onde, por meio dos pós, obtidos do metal utilizado, em proporções micrométricas, é exposto a um campo magnético (para que sejam desencadeadas as propriedades magnéticas) e, por fim, é compactado, para que seja levado ao forno de sinterização, em temperaturas na casa dos  $1100^{\circ}\text{C}$ , onde será deixado até que a peça desenvolva a forma desejada, sendo necessário, portanto, somente posteriores tratamentos térmicos de recozimento (MÜNCHEN, 2016).

Em geral, para que sejam obtidas as propriedades desejadas de ímãs permanentes, não é necessário apenas se preocupar com a existência da fase Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, mas também com a quantificação de cada elemento de liga presente, de forma a garantir que haja em abundância a fase ferromagnética (FIM, 2018).

## 2.4 Estator

Estatores de motores elétricos, como ilustrado na figura 5, pouco se diferem quanto ao seu uso em motores assíncronos ou IPMSynRM, visto que para ambas aplicações desempenham a mesma função. Atualmente, os estatores são construídos com finas lâminas de material ferromagnético, com espessura menor que 1mm, isoladas eletricamente entre si. Essa configuração visa evitar o surgimento de correntes parasitas no estator, pois essas correntes elétricas induzidas pela oscilação, gerada no campo magnético das bobinas, são responsáveis por uma grande perda de energia pelo motor, afetando sua eficiência. Com o intuito de isolar eletricamente as placas, utiliza-se, na indústria, diversas técnicas e materiais, dentre as quais, a mais utilizada é a oxidação do material das lâminas, criando uma camada isolante em sua superfície (ESSWEIN JR. *et al.*, 2018).

Figura 5 – Representação gráfica de uma lâmina do estator



Fonte: Os autores (2021).

O material utilizado na fabricação dos núcleos do estator necessita alta resistividade e alta permeabilidade magnética. A resistividade visa evitar o surgimento de correntes de Foucault nas lâminas, visto que a corrente elétrica e resistência elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais. Em relação a permeabilidade magnética, quanto maior a permeabilidade magnética dos núcleos, menor será o campo magnético nos núcleos e maior será a intensidade de campo

no entreferro. Observa-se que o torque desenvolvido nos motores elétricos é proporcional à densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, núcleos do estator, construídos com materiais de maior permeabilidade magnética, resultam em motores com um melhor desempenho (ESSWEIN JR. *et al.*, 2018).

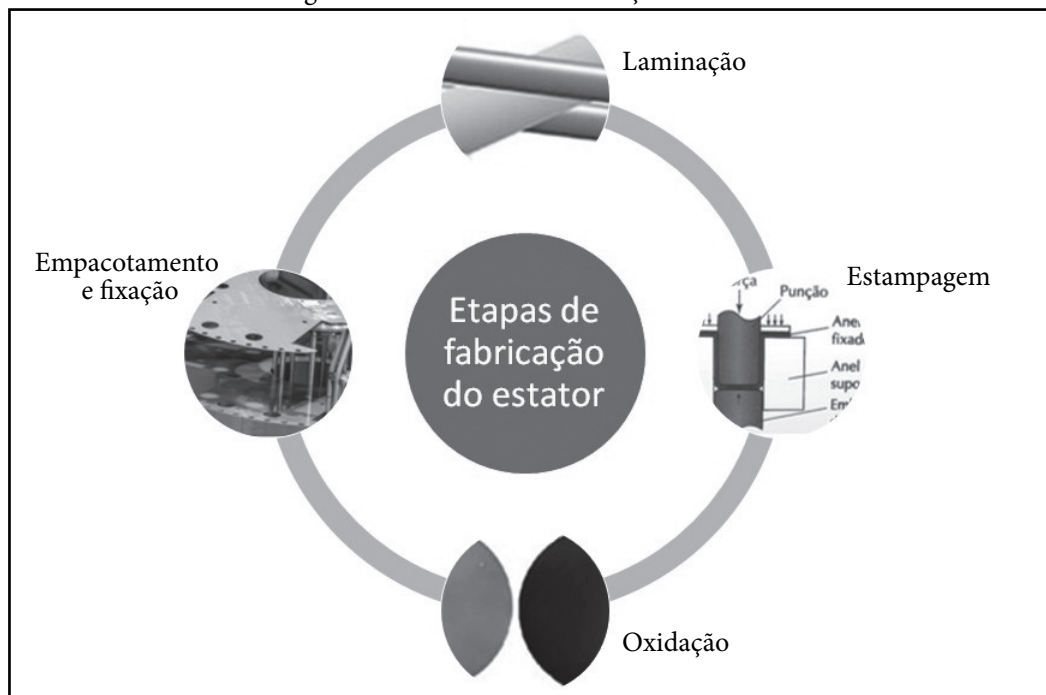
Os materiais mais utilizados na fabricação do núcleo de estatores, na indústria, são os aços de baixo carbono, os quais apresentam custo reduzido e permeabilidade magnética favorável. Entretanto, devido a sua baixa resistividade em relação a outras ligas, pode substituir-se por aço silício de grão não orientado (GNO), com percentual de silício de aproximadamente 3% que, além de possuir alta resistividade, possui também alta permeabilidade magnética. Vale salientar que, com a utilização de aspersão térmica a plasma (ATP), consegue-se aumentar o teor de silício em até 6,5%, diminuindo em 10% as perdas magnéticas. Porém, o custo-benefício dessa técnica deverá ser analisado durante a pesquisa (LALL; BAUM, 1998; SILVEIRA, 2013; TOLEDO, 2007).

Estatores tem por finalidade, através da corrente alternada trifásica em suas bobinas, gerar um campo magnético rotativo (RMF). Nos motores síncronos de ímãs permanentes, os polos do campo magnético, gerado pelos ímãs do rotor, devem estar alinhados ou não passar de um determinado ângulo limite de desalinhamento (ângulo de carga) com os do RMF.

Logo, conclui-se que: para cada polo do campo magnético, gerado pelos ímãs do rotor, deve haver um polo (de orientação magnética oposta) correspondente, gerado nas bobinas do estator. Já, para motores assíncronos com rotores do tipo gaiola de esquilo, não se faz necessário esse alinhamento, visto que o rotor irá rotacionar, independentemente da posição dos polos do campo, em relação ao mesmo (SANTOS JÚNIOR, 2018).

A fabricação do estator consiste basicamente em cinco etapas: laminação; estampagem; um tratamento para isolamento elétrico; empacotamento e fixação. A laminação do aço consiste em um aquecimento e, após isso, a chapa de aço é forçada a passar entre dois cilindros, que giram em sentidos opostos, com a mesma velocidade. E, ainda, a cada passagem de laminação, o material sofre uma deformação plástica, diminuindo de espessura até chegar na espessura desejada. Já a estampagem consiste na prensagem da chapa apoiada em uma matriz, a qual define o perfil da peça. Após essa etapa, é efetuado um tratamento para isolamento elétrico, que consiste na oxidação das superfícies, como dito anteriormente. O empacotamento e fixação é realizado, utilizando-se o processo de união por compressão, o qual faz uso de uma matriz. Todas as etapas descritas podem ser visualizadas na figura 6 (COELHO, 2011; COSTA, 2003; ESSWEIN JR. *et al.*, 2018; REGONE, 2001).

Figura 6 – Processos de fabricação do estator



Fonte: Os autores (2021).

As bobinas do estator, feitas de cobre, são isoladas entre si, através de um recobrimento com verniz, isoladas de igual forma da ranhura, amarradas com um barbante também isolante e recobertas com uma camada de verniz adicional (OLIVEIRA, 2009).

## 2.5 Funcionamento e isolamento do campo eletromagnético

Os campos eletromagnéticos nos motores funcionam para a rotação dos rotores, sendo aplicada uma corrente alternada trifásica no rotor e no estator, no caso do motor assíncrono e, somente no rotor, no caso do motor síncrono. A corrente formará um campo magnético rotativo em seu centro, porém os diferentes rotores causam uma reação diferente que os faz girar dentro do motor (ENG EASIER, 2017; OLIVEIRA, 2009; REBELLO, 2005).

No motor de indução, o campo giratório é utilizado para (como o nome sugere) induzir uma corrente elétrica pelo rotor que, no caso, seria o chamado “gaiola de esquilo”, assim gerando uma força perpendicular com a corrente, fazendo ele gerar torque e girar. O fenômeno ocorre, a partir da lei da indução de Faraday. Porém, tal motor possui um problema, já que para essa lei funcionar, é necessário de um campo magnético variável, passando pelo metal. Então, o rotor nunca alcança a velocidade de giro do campo, por essa necessidade. É possível observar a representação esquemática do campo giratório na figura 7, seguir (ENG EASIER, 2017; OLIVEIRA, 2009).

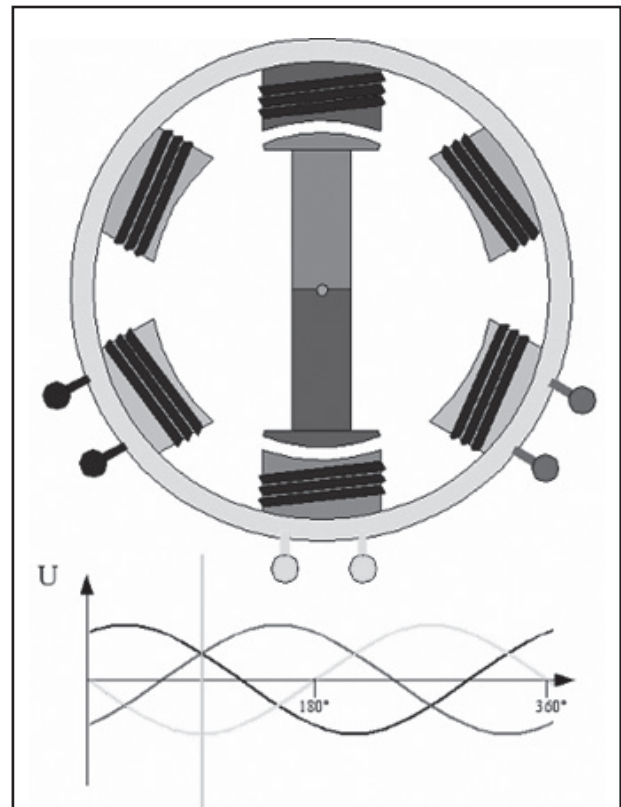
No motor IPM-SynRM, a geração de torque é diferente. Nesse motor, usa-se um conjunto de ímãs neodímio-ferro-boro e um cilindro de aço silício, com furos, nos quais os ímãs se encontram (OLIVEIRA, 2009).

A interação que usa da força eletromagnética e do cilindro de aço silício é chamada de relutância magnética. Esse fenômeno é explicado como a resistência de certos materiais com a passagem de campos magnéticos. Como exemplo, temos o ar e o aço, o ar possui forte relutância, se comparado ao aço, assim o campo sempre percorre o material de menor relutância, e o rotor se mantém na posição que apresenta menor relutância (LESICS PORTUGUÊS, 2021; OLIVEIRA, 2009).

Ao combinar isso com a força de atração e repulsão, que os campos dos ímãs permanentes geram com o campo rotativo dos eletroímãs, acaba por gerar um grande torque no uso desse motor e uma grande estabilidade. E o maior torque acontece,

quando os campos negativo e positivo dos ímãs permanentes e dos eletroímãs se encontram a pelo menos  $45^\circ$  (LESICS PORTUGUÊS, 2021).

Figura 7 – Representação do campo giratório



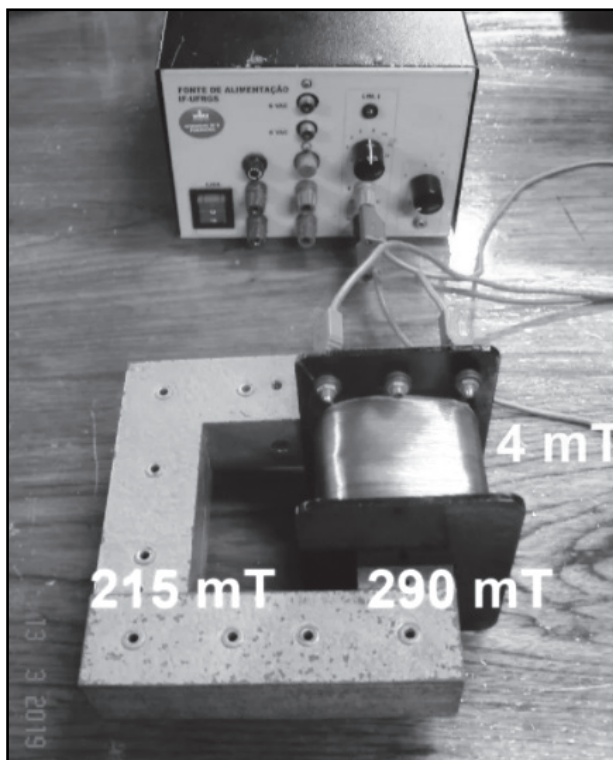
Knüppe e Sefrin (2013).

Já o isolamento de campos magnéticos pode ser feito por um sistema análogo ao da construção de uma Gaiola de Faraday, o qual consiste em um sistema de núcleo fechado, possuindo um material ferromagnético, para provocar um efeito de indução magnética, no interior do motor. Dessa forma, a indução magnética ocorrida no núcleo é grande o suficiente para impossibilitar o aumento do campo magnético nas áreas externas a ele. Na figura 8, é possível observar um sistema de isolamento magnético (LANG, 2019).

A indução magnética, gerada no núcleo do sistema faz com que seja inibida a formação de campos magnéticos intensos no exterior da bobina, de forma que o valor de campo propagado externamente seja ínfimo, quando comparado àquele, gerado na região interna. O mesmo vale para um motor elétrico, o sistema mostrado será responsável por coibir a formação de campos magnéticos fortes externos, assegurando

a integridade elétrica dos componentes do veículo. No geral, são utilizadas ligas de um-metal (Fe-Cr), aço silício e aços de baixo carbono. Esses materiais possuem uma baixa relutância magnética e facilidade de saturação do campo magnético, assim formando um isolamento magnético ao atingirem a saturação (CERVA, 2014; MURTA, 2002; SILVEIRA, 2013).

Figura 8 – Sistema montado para isolamento magnético



Fonte: Lang (2019).

## 2.6 Case

Com a finalidade de atuar como uma carcaça protetora dos componentes do motor elétrico, é necessário o uso de um *case*, o qual pode ser produzido em diversos materiais, bem como aço carbono ou até mesmo compósitos fibrosos. De forma a construir um conjunto motor mais leve e, conseqüentemente, aumentar a autonomia do veículo, o uso de materiais compósitos se faz essencial, principalmente ao se tratar da fibra de carbono que, além de leve, possui alta resistência mecânica. Além disso, outras propriedades da fibra de carbono devem ser exploradas na sua aplicação em *cases* para motores elétricos, como a alta resistência à corrosão, oxidação, umidade e temperatura (SARTURI, 2014).

Um mecanismo de melhoria para a fibra de carbono, aplicada em *cases* para motores elétricos, é utilizar resina poliéster no processo de laminação desse material compósito, para que haja aumento na resistência ao impacto. A resina é aplicada entre as camadas de fibra de carbono, produzindo uma estrutura do tipo sanduíche, com elevada resistência mecânica. Porém, para se atingir as propriedades almejadas, é necessário acrescentar um catalisador e um endurecedor, de forma a acelerar o processo de cura da resina e atingir a resistência a altas temperaturas e ao impacto. Assim que curada a resina, a fibra de carbono estará pronta para aplicação no *case* (ALVES, 2019; BITTENCOURT, 2015).

## 3 Conclusão

Diante dos dados apresentados, é possível concluir que os estudos de motores síncronos, com ímãs permanentes, em relação a motores assíncronos convencionais, têm importância considerável, visto que se apresentam como solução com potencial, para diminuir o custo, associado aos veículos elétricos com motores convencionais, pois permitem que o conjunto motriz possua alta confiabilidade e eficiência, ponto fundamental para impulsionar a substituição da frota atual de veículos à combustão por veículos elétricos, assim, atendendo à crescente pressão de governos de diversos países para concepção de uma locomoção urbana mais eficiente e livre de poluentes.

O desenvolvimento de motores elétricos capazes de se sobressair diante da problemática de desempenho de baixo torque dos veículos movidos à combustão e à emissão de poluentes é de grande importância para mobilidade urbana, principalmente em grandes cidades, onde a concentração desses veículos gera um notável aumento nos níveis de dióxido de carbono no ar atmosférico (GARCÍA; SÁNCHEZ; PÉREZ, 2012).

## Referências

ALVES, F. L. **Análise da influência da orientação do ângulo de fibra na resistência à tração do compósito laminado de fibra de vidro e resina poliéster**. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

ANH, H. T.; HSIEH, M. Comparative study of PM-assisted SynRM and IPMSM on constant power speed range for EV applications. *In: INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE*, 2017, Dublin.



- Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2017. p. 1-6. DOI: 10.1109/INTMAG.2017.8008078.
- AZUAGA, D. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil**. 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Curso de Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://antigo.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/dazuaga>. Acesso em: 4 out. 2021.
- BITTENCOURT, A. P. P. **Estudo comparativo de processos de obtenção de compósitos fibra de vidro/poliéster**. 2015. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Naval) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/133862/TCC%20-%20MODIFICADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- BOÇON, G. S. **Análise do impacto de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica**. 2019. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- CAVALCANTE JÚNIOR, L. C. P. **Análise comparativa da substituição de motores a combustão por motores elétricos no setor de transportes**. 2021. 13 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021.
- CERVA, L. L. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímãs permanentes e núcleo sinterizado utilizado em um aerogerador**. 2014. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- COELHO, A. **Simulação, projeto e teste de um gerador a relutância chaveado trifásico 6x4**. 2011. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.
- COSTA, A. R. **Análise da estampagem de chapas metálicas utilizando elementos finitos**. 2003. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.
- DORELL, D. G. *et al.* Analysis and design techniques applied to hybrid vehicle drive machines – assessment of alternative IPM and induction motor topologies. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 10, p. 3690-3699, 2012.
- DURRANT, A. J. **The effect of microstructure and composition on HDDR processing of scrap magnets**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalurgia) – University of Birmingham, Birmingham, 2013. Disponível em: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4919/1/Durrant14MRes>.
- EHSANI, M.; YIMIN, G.; GAY, S. Characterization of electric motor drives for traction applications. *In: THE ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY*, 29., 2003, Roanoke. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2003. v. 1, p. 891-896. DOI: 10.1109/IECON.2003.1280548.
- ENG EASIER. Motor de indução: como funcionam. 21 ago. 2017. 1 vídeo (4 min 43 s). Publicado pelo Canal Eng Easier. Disponível em: [https://youtu.be/tinXAU5N\\_2c](https://youtu.be/tinXAU5N_2c). Acesso em: 7 fev. 2021.
- ESSWEIN JR., J. A. L. *et al.* **Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos finitos**. Porto Alegre: UFRGS: FEEVALE, 2018. 14 p.
- FIM, R. G. T. **Influência dos parâmetros de processamento na microestrutura e propriedades magnéticas de ímãs permanentes de (Nd,Pr)FeB**. 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Electric machinery**. New York: McGraw-Hill, 1990. 599 p.
- GARCÍA, M. A.; SÁNCHEZ, M. L.; PÉREZ, I. A. Differences between carbon dioxide levels over suburban and rural sites in Northern Spain. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, n. 2, p. 432-439, 2012. DOI: 10.1007/s11356-011-0575-4.
- GOSS, J.; POPESCU, M.; STATON, D. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application. *In: INTERNATIONAL ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES*, 2013, Chicago. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2013. p. 233-38. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556256.
- JEREMIAS, P. H. F. **Avaliação do potencial de redução das emissões de poluentes por meio da implementação do sistema start-stop em veículos a combustão interna da frota da cidade**

- de São Paulo**. 2018. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2018. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188044/TCC\\_Paulo%20Jeremias.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188044/TCC_Paulo%20Jeremias.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 4 out. 2021.
- JURKOVIC, S. *et al.* Next generation chevy volt electric machines: design, optimization and control for *performance* and rare-earth mitigation. *In: ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION, 2015, Montreal, Quebec. Proceedings [...]*. New Jersey: IEEE, 2015. p. 5219-5226. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7310394.
- KHAN, M. A. *et al.* Design and analysis of outer segmental rotor synchronous reluctance machine for future electric bike. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND EMERGING TECHNOLOGIES, 2019, Lahore. Proceedings [...]*. New Jersey: IEEE, 2019. p. 1-5. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711839.
- KNÜPPE, L. L.; SEFRIN, L. H. **Máquinas I: campo girante trifásico**. São Leopoldo: UNISINOS, 2013.
- LALL, C.; BAUM, L. W. High *performance* soft macavalcantegnetic components by powder metallurgy and metal injection molding. Modern Developments. *In: GUMMESON, P. U.; GUSTAFSON, D. A. (ed.). Modern Developments in Powder Metallurgy*. Orlando: Metal Powder Industries Federation, 1998. v. 18, p. 363-389.
- LANG, F. S. **Confinamento do campo magnético num material de alta permeabilidade**. 2019. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=confinamento-do-campo-magnetico-num-material-de-alta-permeabilidade>. Acesso em: 20 out. 2021.
- LESICS PORTUGUÊS. **Motor Tesla Modelo 3: a engenharia brilhante por trás dele**. Youtube, 16 jan. 2021. 1 vídeo. (13 mim 44 s). Publicado pelo Canal Lesics Português. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ztPWVoEjGDk&t=401s>. Acesso em: 7 fev. 2021.
- MORIMOTO, S.; SANADA, M.; TAKEDA, Y. Performance of PM-assisted synchronous reluctance motor for high-efficiency and wide constant-power operation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 5, p. 1234-1240, 2001. DOI: 10.1109/28.952497.
- MUN, J.-E. *et al.* Design characteristics of IPMSM with wide constant power speed range for EV traction. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 53, n. 6, p. 1-4, 2017. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2664859.
- MÜNCHEN, D. D. **Recuperação de neodímio a partir de ímãs de neodímio-ferro-boro por meio de processos mecânicos e hidrometalúrgicos**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- MURTA, M. L. **Blindagem ativa de campos magnéticos em baixa frequência**. 2002. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/JOSP-5JPPXJ>. Acesso em: 8 fev. 2021.
- NASAR, S. A. **Handbook of electric machines**. New York: McGraw-Hill, 1987.
- OLIVEIRA, J. G. S. M. **Materiais usados na construção de motores elétricos**. 2009. 69 f. Seminário Técnico apresentado como requisito parcial à obtenção do grau G1 na disciplina de Materiais Elétricos (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- OLIVEIRA, M. V. **Levantamento de emissões atmosféricas por veículos automotores leves**. 2020. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2020.
- ÖNAL, M. A. R. *et al.* Recycling of NdFeB magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. **Hydrometallurgy**, v. 167, p. 115-123, 2017. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.11.006.
- PIRES, W. L. **Estudo do comportamento das perdas no ferro em motores de indução alimentados por conversores de frequência**. 2008. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/92068/256744.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- REBELLO, A. L. S. **Motor elétrico e propriedades magnéticas**. 2005. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível

- em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2856/4/ALSRabello>. Acesso em: 7 fev. 2021.
- REGONE, W. **Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (IF) através de ensaios de torção**. 2001. 174 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.
- SANTOS, S. C. **Inovações tecnológicas na indústria automobilística: características intrínsecas, estratégias tecnológicas e enquadramento do setor na lógica da Cop 21**. 2017. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/23858/1/TCC%20-%20Samuel%20Coelho%20dos%20Santos%20vers%3a3o%202017>. Acesso em: 1º out. 2021.
- SANTOS JÚNIOR, J. A. **Construção, acionamento, controle e análise de desempenho de um motor síncrono a relutância**. 2018. 154 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- SARTURI, F. D. M. **Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono**. 2014. 234 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade do Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- SEO, J.-H *et al.* Research on iron loss of IPMSM with a fractional number of slots per pole. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 45, n. 3, p. 1824-1827, 2009.
- SILVEIRA, F. L. **Material para blindagem magnética**. 2013. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=material-para-blindagem-magnetica>. Acesso em: 8 fev. 2021.
- STAUNTON, R. H. *et al.* **PM motor parametric design analyses for a hybrid vehicle traction drive application**. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2004. 110 p.
- TAFFAREL, V. S. **Mobilidade urbana: análise dos fatores que causam contínuo crescimento do uso do automóvel nas cidades brasileiras**. 2015. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127665/000971034.pdf?sequen>. Acesso em: 4 out. 2021.
- TOLEDO, T. F. **Siliciação de aço silício**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
- YEDAMALE, P. **AN885: brushless DC (BLDC) motor fundamentals**. 2003. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.
- YILMAZ, M. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 80-99, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.033.
- ZERAOULIA, M.; BENNOUZID, M. E. H.; DIALLO, D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 55, n. 6, p. 1576-1764, 2006.

